

DOI 10.66032/2221-2574-2025-1-4-72-77

УДК 621.372.56

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ИНВЕРТИРОВАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И СИММЕТРИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИЙ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АТТЕНУАТОРОВ

**Пилькевич Антон Владимирович**

аспирант Института радиоэлектроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

E-mail: [anton-pi@yandex.ru](mailto:anton-pi@yandex.ru)

**Садков Виктор Дмитриевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

*Аннотация:* В статье представлено исследование методов проектирования плёночных поглощающих элементов для радиотехнических устройств. Основное внимание уделяется разработке инновационных подходов к созданию топологий поглощающих элементов, способных эффективно работать в различных режимах. В работе проведён детальный анализ существующих решений на основе однородных и кусочно-однородных резистивных структур, выявлены их ключевые преимущества и ограничения. Предложен принципиально новый метод проектирования, основанный на принципах инвертирования граничных условий и симметрии, позволяющий получать топологии с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Разработанная методика обеспечивает возможность создания поглощающих элементов с оптимизированными параметрами: повышенной стабильностью в импульсном режиме, упрощённой технологией изготовления и расширенным функционалом. Особое внимание уделено математическому аппарату конформных отображений, позволяющему точно рассчитывать электрические и тепловые характеристики разрабатываемых структур. Практическая ценность исследования заключается в возможности применения полученных результатов при проектировании современных аттенуаторов различного типа, включая волноводные, коаксиальные и полосковые системы, а также элементы гибридных интегральных схем. Разработанные подходы открывают новые перспективы для создания высокоэффективных радиотехнических устройств с улучшенными техническими характеристиками.

*Ключевые слова:* плёночный поглощающий элемент, аттенуатор, инверсия граничных условий, принцип симметрии, резистивная структура.

Для создания аттенуаторов волноводов, коаксиальных и полосковых линий, а также элементов гибридных интегральных схем (ГИС) для ВЧ и СВЧ диапазонов широко используются плёночные резистивные поглотители [1–3]. Представленные в литературе топологии этих элементов основаны на однородных и кусочно-однородных резистивных структурах. Они обеспечивают широкий диапазон ослабления сигнала, минимизируют плотность мощности и градиенты потенциала около входного контакта. Применение кусочно-однородных структур позволяет сократить размеры элементов, увеличить диапазон ослабления при небольших значениях и значительно улучшить работу в импульсном режиме [1].

Предлагается методика, основанная на принципах инвертирования граничных условий и симметрии, для создания новых вариантов топологий поглотителей. Эти новые варианты могут обладать улучшенными характеристиками по частоте и мощности, быть более простыми в изготовлении и более стабильными в работе в импульсном режиме. Кроме того, для ослабления и входного сопротивления эти элементы могут иметь простые зависимости.

В основе методики лежит использование аппарата конформных отображений [1, 4–6]. Суть подхода состоит во взаимной замене участков с контактами и без них (построением дуальной структуры), после чего исходная топология по-

глощающего элемента (ПЭ) отображается на каноническую область — круг, прямоугольник, полосу или верхнюю полуплоскость. Именно в такой



Рис. 1. Резистивная структура в верхней полуплоскости

канонической области становится возможным относительно просто определить структуру поля и вычислить интегральные характеристики элемента, включая электрические и тепловые сопротивления и проводимости, ёмкости. Аналитическая функция, устанавливающая взаимно однозначное соответствие отображаемых областей, позволяет по известным линиям тока и линиям потенциала в канонической области определить структуру поля в исследуемой области. Интегральные же характеристики поля (токи, заряды, ёмкости, проводимости, сопротивления) при конформных отображениях не меняются.

Важное достоинство метода — унифицированный характер расчётных методик, основанный на принципе подобия и позволяющий с помощью одних и тех же соотношений рассчитывать электрические, тепловые, магнитные поля и их интегральные характеристики — сопротивления, ёмкости, индуктивности, тепловые проводимости:

$$1/\sigma R = 1/\mu R_M = 1/\lambda R_T = C/\varepsilon, \\ G_M/\mu = G_T/\lambda = G\sigma = C/\varepsilon,$$

где  $G$ ,  $G_M$  и  $G_T$  — электрическое, магнитное и тепловое сопротивления рассчитываемого микроэлемента;  $C$  — ёмкость микроэлемента;  $\sigma$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  — электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коэффициент теплопроводности, диэлектрическая проницаемость соответственно.

Статическая задача формулируется следующим образом [4, 5]: на действительной оси даны раздельно лежащие отрезки  $(a_k, b_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$  ( $a_1 < b_1 < \dots < b_n$ ). Через  $D^I$  обозначена совокупность этих отрезков, через  $D^{II}$  — остальная часть действительной оси ( $D = D^I + D^{II}$  — вся действительная ось), так что  $D^{II}$  состоит из конечного числа отрезков  $(b_k, a_{k+1})$  при  $k = 1, 2, \dots, n-1$  и из бесконечного отрезка  $(b_n, a_1)$ , состоящего из полупрямых  $b_n < x < \infty$  и  $-\infty < x < a_1$  (рис. 1). Требуется найти функцию

$\Phi(z) = U + iV$ , гомоморфную в верхней полуплоскости и ограниченную на бесконечности, по граничному условию  $U^+ = f(t)$  на  $D^I$  и  $V^+ = g(t)$  на  $D^{II}$ . Это краевая задача Келдыша — Седова. В дуальной структуре контакты отсутствуют на участках  $a_k, b_k$  и находятся на участках  $b_k, a_{k+1}$ .

Известно, что задача не имеет решений, ограниченных вблизи всех концов отрезков. Если отказаться от условия ограниченности  $\Phi(z)$  и требовать лишь ограничения интеграла от неё (функции  $f(t)$  и  $g(t)$  удовлетворяют условию Гельдера), то задача решается с точностью до  $n+1$  произвольного постоянного. Наконец, задача имеет единственное решение, если, кроме того, потребовать, чтобы  $\Phi(z)$  была ограниченной вблизи каких-либо отрезков, и задать её значение в некоторой точке. Тогда общее решение задачи класса  $h_0$  имеет вид [5]

$$\Phi(z) = \psi(z) + \varphi_0(z),$$

где  $\varphi_0(z)$  — общее решение класса  $h_0$  однородной задачи (при  $f(t) = g(t) = 0$ ),

$$\varphi_0(z) = \frac{C_0 z^n + C_1 z^{n-1} + \dots + C_n}{\sqrt{\prod_{k=1}^n (z - a_k)(z - b_k)}},$$

где  $C_0, \dots, C_n$  — произвольные действительные числа;  $\psi(z)$  — одно из частных решений исходной задачи,

$$\psi(z) = \frac{1}{\pi i} \sqrt{\frac{\prod_{k=1}^n (z - a_k)}{\prod_{k=1}^n (z - b_k)}} \int_D \frac{\prod_{k=1}^n (z - b_k)}{\prod_{k=1}^n (z - a_k)} \frac{h(t) dt}{t - z}, \\ h(t) = \begin{cases} f(t) \text{ на } D^I \\ ig(t) \text{ на } D^{II} \end{cases}$$

Общий вид решения исходной задачи класса  $h(a_1, \dots, a_n)$  имеет вид

$$\Phi(z) = \psi(z) + C \sqrt{\frac{\prod_{k=1}^n (z - a_k)}{\prod_{k=1}^n (z - b_k)}},$$

где  $C$  — произвольная постоянная.

Решение  $\varphi_0(z)$  описывает структуры, в которых участки  $(a_k, b_k)$  эквипотенциальны (на них

$f(t) = \text{const}$ ), а на  $(b_k, a_{k+1})$  задано условие  $q(t) = 0$  (граница структуры — линия тока).

Искомая потенциальная функция определяется как  $U(x,y) = \text{Re}\Phi(z)$ . По известной потенциальной функции матрица, например, погонных ёмкостей  $[C]$  задачи (с учётом электрогидродинамических аналогий) вычисляется следующим образом [1]:

$$C_{k,1} = 2\varepsilon X_{k,1}, C_{k,n} = 2\varepsilon X_{k,n-1}, C_{k,p} = 2\varepsilon(X_{k,p} - X_{k,p-1}),$$

$$X_{k,j} = \det[E_{k,j}] / \det[F],$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $p = 2, 3, \dots, n-1$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Элементы матриц  $[F]$  и  $[E_{k,j}]$ :

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{1,0} \\ F_{2,n-2} & F_{2,n-3} & \cdot & \cdot & F_{2,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{n-1,0} \end{bmatrix},$$

$$[E_{k,j}] = \begin{bmatrix} F_{1,n-2} & F_{1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{1,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{j-1,n-2} & F_{j-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{j-1,0} \\ E_{k,n-2} & E_{k,n-3} & \cdot & \cdot & E_{k,0} \\ F_{j-1,n-2} & F_{j-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{j-1,0} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ F_{n-1,n-2} & F_{n-1,n-3} & \cdot & \cdot & F_{n-1,0} \end{bmatrix}$$

выражаются следующими гиперэллиптическими интегралами:

$$F_{k,m} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \frac{t^m dt}{\sqrt{R(t)}}, E_{k,m} = (-1)^{k-1} \int_{a_k}^{b_k} \frac{t^m dt}{\sqrt{-R(t)}},$$

$$R(t) = (t - a_1)(t - b_1)(t - a_2)(t - b_2) \dots (t - a_n)(t - b_n).$$

Гиперэллиптические интегралы  $F_{k,m}$ ,  $E_{k,m}$  вычисляются с использованием квадратурных формул наивысшей алгебраической степени точности после приведения интервалов интегрирования к стандартному  $(-1, 1)$  и выделению особенностей в весовую функцию  $1/(1-w^2)^{1/2}$  [7]:

$$\int_{-1}^1 \frac{g(w)dw}{\sqrt{1-w^2}} \approx \frac{\pi}{N} \sum_{n=1}^N g \cos \frac{2n-1}{2N} \pi.$$

Для пассивного многополюсника неопределённые матрицы проводимости и импеданса:

- должны быть сингулярными, т.е.

$$\sum_{m=1}^n Y_{lm} = \sum_{l=1}^n Y_{lm} = 0, \sum_{m=1}^n Z_{lm} = \sum_{l=1}^n Z_{lm} = 0,$$

где  $n$  — число контактов ПЭ;

- иметь взаимно-обратные алгебраические дополнения  $(n-1)$ -ого порядка, т.е.  $\rho \Delta Y_{n-1} = \Delta Z_{n-1} / \rho$ , где  $\rho$  — удельное поверхностное сопротивление резистивного слоя;

- в силу физической реализуемости  $Y_{ii} > 0$ ,  $\Delta Y_{n-1} > 0$  и  $Z_{ii} > 0$ ,  $\Delta Z_{n-1} > 0$  при  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

- не иметь ненулевых элементов  $Y_{ij} \neq 0$ ,  $Z_{ij} \neq 0$  при  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

- в силу взаимности  $Y_{ij} = Y_{ji}$  и  $Z_{ij} = Z_{ji}$  при  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ .

В структуре с инвертированными граничными условиями (дуальной) имеют место равные безразмерные элементы неопределённых матриц проводимости и импеданса, которые в соответствии с общими правилами вычисления равны

$$\rho Z_{lm} = Z_{l-1m}^d / \rho, Z_{lm} / \rho = \rho \Delta Z_{l-1m}^d,$$

где  $d$  соответствует дуальной структуре.

Очевидно, что определители  $(n-1)$ -ого порядка равны

$$\rho \Delta Y_{n-1} = \Delta Z_{n-1}^d / \rho, \Delta Z_{n-1} / \rho = \rho \Delta Y_{n-1}^d.$$

Такие соотношения справедливы и для многополюсников на основе кусочно-однородных резистивных структур [8].

$[Y]$  — матрица резистивного поглощающего элемента, соответствующая конкретному режиму включения (заземлению  $j$ -ого контакта, замыкании  $i$ -ого и  $k$ -ого контакта и т.д.), легко получается известными преобразованиями исходной неопределённой матрицы.

Для трёхконтактной симметричной структуры ПЭ

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вых}} = 1 / \sqrt{\Delta F} = \rho F, q = 20 \lg \frac{Y_{11} + \sqrt{\Delta Y}}{Y_{21}}, \text{ дБ},$$

где  $\Delta Y$  — определитель матрицы  $[Y]$  размером  $2 \times 2$ ;  $F$  — аналитическое соотношение, учитывающее геометрические размеры топологии резистивной плёнки исходного ПЭ.

Тогда для дуальной структуры  $q = q^d$ ,  $R_{\text{вх}}^d = R_{\text{вых}}^d = \rho / F$ . Из последнего соотношения

по известному  $F$  определяется величина  $\rho$  для получения заданных величин  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$ .

Возможно рассмотреть ряд примеров использования предлагаемой методики. Следует отметить, что ряд топологий используется в симметричном относительно линии  $O-O'$  варианте. На рис. 2 приведены Т-образные топологии ПЭ, позволяющие расширить диапазон реализуемых ослаблений в область малых ослаблений, особенно при использовании кусочно-однородных структур с удельными поверхностными сопротивлениями  $\rho_1$  и  $\rho_2$  [9].

На рис. 3 представлены варианты ПЭ для реализации больших ослаблений [10]. Дуальный вариант рис. 3, б позволяет исключить операцию травления резистивной плёнки.

Топология рис. 4, а [11] удобна для использования в поверхностном монтаже, дуальная топология в симметричном варианте интересна для применения в микрополосковых трактах.

Наряду с прямоугольными структурами находят применение и треугольные топологии ПЭ (рис. 5, а). Очевидно, исходя из [1], уменьшение плотности мощности и градиента потенциала вблизи входного контакта в дуальной структуре рис. 5, б.

Важно подчеркнуть, что любая асимметрия в топологиях относительно вертикальной оси симметрии приводит к различию входного и выходного сопротивлений ПЭ, который, наряду с ослаблением, будет выполнять функцию трансформатора импеданса [12].

На рис. 6 дуальная топология позволяет реализовать в малых габаритах для ГИС трансформаторы с коэффициентом трансформации  $R_{вх}/R_{вых}$ , превышающим 100 [13].

Для уменьшения плотности мощности и градиента потенциала вблизи входного контакта оптимизируют профиль входных/выходных контактов и скругляют острые углы в топологиях по методике [1, 14, 15].

### Заключение

Проведённое исследование позволило достичь

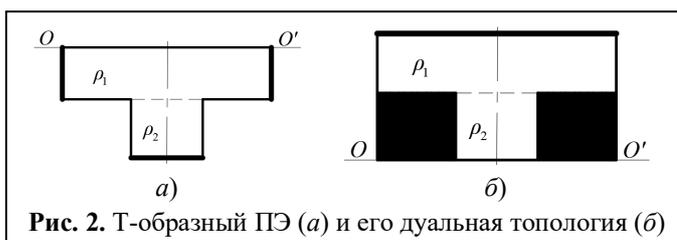


Рис. 2. Т-образный ПЭ (а) и его дуальная топология (б)

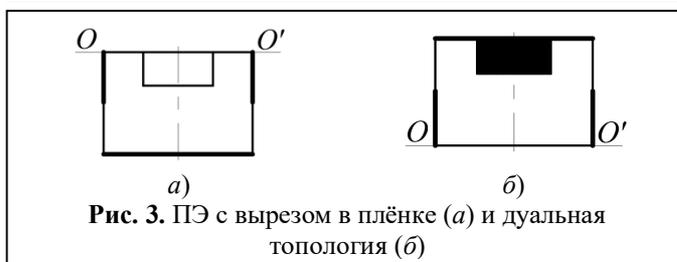


Рис. 3. ПЭ с вырезом в плёнке (а) и дуальная топология (б)

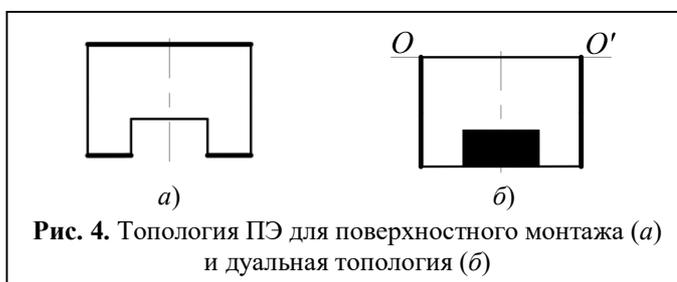


Рис. 4. Топология ПЭ для поверхностного монтажа (а) и дуальная топология (б)

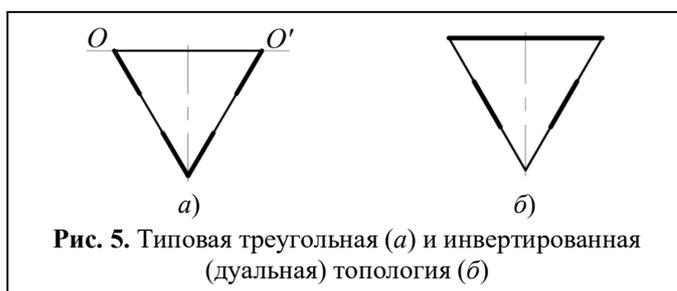


Рис. 5. Типовая треугольная (а) и инвертированная (дуальная) топология (б)

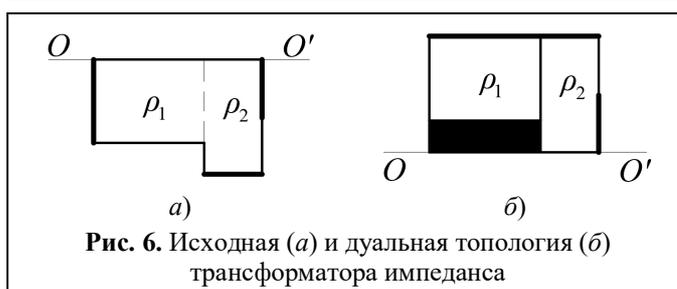


Рис. 6. Исходная (а) и дуальная топология (б) трансформатора импеданса

значимых результатов в области проектирования плёночных ПЭ для аттенуаторных устройств.

Предложенный метод существенно расширяет возможности проектирования эффективных поглощающих структур с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Особую ценность представляет разработанный математический аппарат, позволяющий проводить комплексный анализ электрических,

тепловых и магнитных полей ПЭ. Это даёт возможность точно прогнозировать поведение разрабатываемых структур в различных режимах работы.

Практическая реализация методики продемонстрировала ряд существенных преимуществ: возможность создания компактных топологий с оптимизированными параметрами; повышение эффективности работы в импульсном режиме; упрощение технологического процесса изготовления; расширение функциональных возможностей ПЭ за счёт асимметричных решений.

Перспективность дальнейших исследований обусловлена возможностью расширения области применения разработанной методики и совершенствования алгоритмов расчёта параметров ПЭ для создания ещё более эффективных решений в области радиотехнических устройств.

#### Литература

1. Садков В.Д., Пилькевич А.В., Фомина К.С. Моделирование резистивных плёночных структур: учебное пособие // НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2023. 279 с.
2. Кочемасов В.Н., Белов Л.А. Фиксированные аттенюаторы — производители и характеристики. Ч. 1 // Электроника НТБ. 2017. №6. С. 108–116.
3. Кочемасов В.Н., Белов Л.А. Фиксированные аттенюаторы – производители и характеристики. Ч. 2 // Электроника НТБ. 2017. № 7. С. 90–94.
4. Лаврентьев М.А., Шабат В.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1973. 736 с.
5. Мухомелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. Граничные задачи теории функций и некоторые их приложения к математической физике. М.: Наука, 1968. 513 с.
6. Пилькевич А.В., Садков В.Д. Использование принципов инвертирования граничных условий и

симметрии для получения новых вариантов топологий поглощающих элементов аттенюаторов // Тезисы докл. XXX Межд. НТК «Информационные системы и технологии — ИСТ 2024». Нижний Новгород; НГТУ, 2024. С. 36.

7. Крылов В.И. Приближённое вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.

8. Манолеску А., Манолеску А.М., Хоментковски Д. Важные случаи симметрии распределённых резистивных структур // ТИИЭР. Т. 70. №12. 1982. С. 92–94.

9. Уткин В.Н., Садков В.Д., Якимов Д.Ю. Расчёт Т-образных поглощающих элементов чип-аттенюаторов для поверхностного монтажа // Известия вузов. Электроника. 2008. № 1. С. 86–88.

10. Садков В.Д., Фомина К.С., Пилькевич А.В. Поглощающие элементы на основе однородной резистивной плёнки для реализации широкого диапазона ослаблений мощности радиосигналов // Известия вузов. Электроника. 2018. № 5. С. 477–485.

11. Садков В.Д., Якимов Д.Ю. Расчёт П-образных поглощающих элементов чип-аттенюаторов для поверхностного монтажа // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. №10. С. 76–80.

12. Пилькевич А.В., Садков В.Д. Тонкоплёночные поглощающие элементы адаптоаттенюаторов для ГИС // Известия вузов. Электроника. 2021. №6. С. 521–532.

13. Пилькевич А.В., Садков В.Д. Поглощающие элементы адаптоаттенюаторов с большим коэффициентом трансформации // Тезисы докладов XXIX Межд. НТК «Информационные системы и технологии – ИСТ 2023». Нижний Новгород; НГТУ, 2023. С. 33.

14. Садков В.Д., Уткин В.Н. Оптимальный профиль входных контактов аттенюаторной пластины на основе распределённых резистивных структур // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2008. №12. С. 65–67.

15. Садков В.Д., Пилькевич А.В., Фомина К.С. Оптимизация топологии плёночных поглощающих элементов ВЧ и СВЧ аттенюаторов // Проектирование и технология электронных средств. 2020. №1. С. 8–13.

Поступила 23 апреля 2025 г.

English

## USING THE PRINCIPLES OF INVERTING BOUNDARY CONDITIONS AND SYMMETRY TO OBTAIN NEW VARIANTS OF TOPOLOGIES FOR ABSORBING ELEMENTS OF ATTENUATORS

**Anton Vladimirovich Pilkevich** — Postgraduate student, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev.  
E-mail: [anton-pi@yandex.ru](mailto:anton-pi@yandex.ru)

**Viktor Dmitrievich Sadkov** — PhD in Engineering, Associate Professor, Computer Aided Design and Manufacturing Department, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev.

*Address:* 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Minin str., 24.

*Abstract:* Film resistive elements are widely used in the construction of waveguide, coaxial, and stripline attenuators. Existing literature describes absorbing element topologies based on distributed homogeneous and piecewise-homogeneous resistive structures, which provide a wide range of attenuation, while minimizing power density and potential gradients near the input contact. The use of piecewise-homogeneous structures makes it possible to significantly reduce the size of the absorbing elements, extend the attenuation range to include low values, improve performance in pulsed mode, and design elements for mounting in a microstrip line with the resistive film facing down, facing up, or embedded within a substrate hole. A method is proposed for developing new, original variants of absorbing element topologies. These may include topologies with improved frequency and power characteristics, a simplified manufacturing process, and greater stability for pulsed-mode operation. Simple relations for the attenuation and input resistance of the new absorbing element are also derived.

*Keywords:* film absorbing element, attenuator, inversion of boundary conditions, principle of symmetry, resistive structure.

### References

1. *Sadkov V.D., Pilkevich A.V., Fomina K.S.* Modeling of resistive film structures: study guide. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. Nizhny Novgorod, 2023. 279 p.
2. *Kochemasov V.N., Belov L.A.* Fixed attenuators-manufacturers and specifications. Part 1. *Elektronika NTB*. 2017. No. 6. Pp. 108–116.
3. *Kochemasov V.N., Belov L.A.* Fixed attenuators-manufacturers and specifications. Part 2. *Elektronika NTB*. 2017. No. 7. Pp. 90–94.
4. *Lavrentyev M.A., Shabat B.V.* Methods of the theory of functions of complex variable. Moscow: Nauka, 1973. 736 p.
5. *Muskhelishvili N.I.* Singular integral equations. Boundary value problems in the theory of functions and some of their applications to mathematical physics. Moscow: Nauka, 1968. 513 p.
6. *Pilkevich A.V., Sadkov V.D.* Using the principles of inverting boundary conditions and symmetry to obtain new variants of topologies for absorbing elements of attenuators. Coll. of abstracts of XXX Int. conf. "Informacionnye sistemy i tehnologii – IST 2024". Nizhny Novgorod; Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. 2024. P. 36.
7. *Krylov V.I.* Approximate calculation of integrals. Moscow: Nauka, 1967. 500 p.
8. *Manolescu A., Monolescu A.M., Khomentovskiy D.* Important cases of symmetry of distributed resistive structures. *TIIER*, Vol. 70. No. 12. 1982. Pp. 92–94.
9. *Utkin V.N., Sadkov V.D., Yakimov D.Y.* Calculation of the T-shaped absorbing elements of chip-attenuators for surface mounting. *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 2008. No. 1. Pp. 86–88.
10. *Sadkov V.D., Fomina K.S., Pilkevich A.V.* Absorbing elements on the basis of a uniform resistive film for realization of wide range of power attenuations of radio signals. *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 2018. No. 5. Pp. 477–485.
11. *Sadkov V.D., Yakimov D.Y.* Calculation of U-shaped absorbing elements of chip attenuators for surface mounting. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*. 2009. No. 10. Pp. 76–80.
12. *Pilkevich A.V., Sadkov V.D.* Thin-film absorbing elements of adaptoattenuators for HIC. *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 2021. No. 6. Pp. 521–532.
13. *Pilkevich A.V., Sadkov V.D.* Absorbing elements of adaptoattenuators with a high transformation coefficient. Coll. of abstracts of XXIX Int. conf. "Informacionnye sistemy i tehnologii – IST 2023". Nizhny Novgorod; Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. 2023. P. 33.
14. *Sadkov V.D., Utkin V.N.* Optimal profile of input contacts of an attenuator plate based on distributed resistive structures. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*. 2008. No. 12. Pp. 65–67.
15. *Sadkov V.D., Pilkevich A.V., Fomina K.S.* Optimization of topology of the film absorbing elements HF and very high frequency of attenuators. *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2020. No. 1. Pp. 8–13.